棉籽粕膨化前后品质变化及对生长育肥猪生长性能、血清生化指标及营养物质表观消化率的影响[1]

倪海球[1] 孙 杰[2] 杨玉娟[1,3] 于纪宾[1] 马世峰[1] 王 昊[1] 商方方[1] 李军国[1,4*]

（1.中国农业科学院饲料研究所，北京 100081；2.上海新农饲料股份有限公司，上海 201613；3.农业部食物与营养发展研究所，北京 100081；4.农业部饲料生物技术重点实验室，北京 100081）

摘 要：本试验旨在研究湿法挤压膨化加工对棉籽粕中营养物质、游离棉酚含量的影响，以及膨化棉籽粕对生长育肥猪生长性能、血清生化指标及营养物质表观消化率的影响。首先，采用牧羊 56×2 挤压膨化机和前期优化后的加工参数组合对棉籽粕进行膨化，对比测定棉籽粕和膨化棉籽粕的营养物质和游离棉酚含量的变化。然后，以棉籽粕和膨化棉籽粕为主要试验材料，选取 80 头体重为（28.78±3.09） kg 的杜×长×大三元杂交猪为试验动物，随机分为 5 个组，每组 4 个重复，每个重复 4 头猪（公母各占 1/2）。对照组饲喂全玉米–豆粕型基础饲粮，试验 1 组饲喂添加普通棉籽粕（生长期添加 5%普通棉籽粕，育肥期添加 10%普通棉籽粕）的饲粮，试验 2 组、试验 3 组、试验 4 组分别饲喂添加膨化棉籽粕（生长期分别添加 5%、10%和 15%膨化棉籽粕，育肥期分别添加 10%、15%和 20%膨化棉籽粕）的饲粮，各组饲粮中代谢能和粗蛋白质等营养水平均调配均衡。试验期 13 周（生长期 6 周，育肥期 7 周）。结果表明：1）挤压膨化处理对棉籽粕营养物质含量无明显影响，膨化棉籽粕总氨基酸含量和各个必需氨基酸含量略有升高，游离棉酚含量降低了 87.85%。2）生长期，饲粮中添加 5%膨化棉籽粕与相同含量的普通棉籽粕相比可提高生长猪的平均日采食量和平均日增重（P>0.05），显著降低料重比（P<0.05），并显著提高粗蛋白质、干物质、粗脂肪和部分氨基酸表观消化率（P<0.05）；饲粮中添加膨化棉籽粕比起添加棉籽粕可显著降低生长猪血清中丙二醛（MDA）含量（P<0.05），显著提高生长猪的总抗氧化能力（T-AOC）、超氧化物歧化酶（SOD）活性和谷胱甘肽过氧化物酶（GSH-Px）活性（P<0.05）；饲粮中添加膨化棉籽粕比起添加棉籽粕有提高生长猪血清中免疫球蛋白、三碘甲腺原氨酸和四碘甲腺原氨酸的趋势；随着膨化棉籽粕添加量的增加，生长猪的生长性能和营养物质表观消化率均呈现降低趋势，当添加量达 15%时与普通棉籽粕组相比无显著差异（P>0.05）。3)育肥期，各膨化棉籽粕组末均重、平均日增重和平均日采食量与对照组和普通棉籽粕组相比差异不显著（P>0.05），但全期试验 2 组和试验 3 组料重比显著低于试验 1 组（P<0.05）；饲粮中添加膨化棉籽粕比起添加棉籽粕还可以显著提高育肥猪的抗氧化能力和免疫能力（P<0.05），且

收稿日期：2017－10－11

基金项目：公益性行业（农业）科研专项（20120315）；现代农业产业技术体系北京市家禽创新团队项目；国家重点研发计划项目（2016YFF0201800）

作者简介：倪海球（1990—），男，江苏连云港人，硕士研究生，从事饲料加工与动物营养研究。E-mail: haiqiuni@163.com

*通信作者：李军国，研究员，硕士生导师，E-mail: lijunguo@caas.cn

随着膨化棉籽粕添加量的增加，育肥猪血清中 MDA 含量显著降低（$P<0.05$），T-AOC、SOD 活性和 GSH-Px 活性逐渐升高（$P<0.05$）。试验组粗蛋白质表观消化率和干物质表观消化率均显著低于对照组（$P<0.05$），各膨化棉籽粕组粗蛋白质表观消化率与试验 1 组差异不显著（$P>0.05$），各膨化棉籽粕组干物质表观消化率均显著高于试验 1 组（$P<0.05$）；试验 3 组和试验 4 组粗脂肪表观消化率显著高于对照组和试验 1 组（$P<0.05$），且随着膨化棉籽粕添加量的增加，粗脂肪表观消化率逐渐升高。饲粮中添加适量的膨化棉籽粕比起添加棉籽粕可显著提高氨基酸表观消化率（$P<0.05$）。由此可见，挤压膨化加工对棉籽粕营养物质含量影响较小，且能显著降低游离棉酚的含量，在生长育肥猪饲粮中添加膨化棉籽粕可以显著提高生长育肥猪的生长性能、抗氧化能力、免疫能力和营养物质表观消化率，生长猪饲粮中添加量可达 15%，育肥猪饲粮中添加量可达 20%。

关键词：膨化棉籽粕；生长猪；游离棉酚；生长性能；血清生化指标；表观消化率

中图分类号：S816；S828

棉籽粕由于价格低廉、粗蛋白质含量较高，作为一种优质的蛋白质原料用于畜禽饲料生产中，但棉籽粕中游离棉酚含量较高严重制约了其在饲料配方中的使用比例[1-3]，使得在饼粕类饲料中国内产量最高的棉籽粕在畜禽饲料中的利用率不足 35%。因此，寻求一种降低棉籽粕中游离棉酚含量、提高棉籽粕在畜禽饲粮中的添加量和蛋白质的利用率的加工方法，对缓解我国蛋白质饲料资源的短缺、降低生产成本具有重要意义。

挤压膨化是借助挤压机螺杆的推动力，将物料向前挤压，物料受到混合、搅拌和摩擦以及高剪切力作用而获得和积累能量达到高温高压，在挤出模孔的瞬间由于骤然降压而实现体积膨大，使产品的形态发生变化的工艺操作[4]。棉籽粕经过膨化处理后，使棉籽粕中淀粉糊化[5]、蛋白质进一步变性，其他营养物质也发生不同程度的变化，游离棉酚在膨化过程中一部分被降解，另一部分与蛋白质结合形成结合棉酚，从而使游离棉酚的含量显著降低[6-7]，达到脱毒的目的。前人研究表明，挤压膨化能够很好地降低棉籽粕中游离棉酚含量，改善棉籽粕的品质[8-10]；魏二虹等[11]研究发现，棉籽饼在加热处理的条件下，加热过程中的温度、时间和湿度对消除总棉酚、结合棉酚和游离棉酚的含量均有极显著的影响，游离棉酚绝大部分被分解消除，因而较好地达到了脱毒目的。前人研究主要是从挤压膨化对棉籽粕脱毒效果的影响以及膨化棉籽粕对家禽生产性能的影响进行研究，缺乏对棉籽粕挤压膨化加工技术以及膨化棉籽粕对生长育肥猪生长性能、血清生化指标和营养物质表观消化率影响的综合研究。因此，本试验旨在探索挤压膨化对棉籽粕营养成分和游离棉酚含量的影响，同时通过饲喂试验，考察膨化棉籽粕作为蛋白质原料饲喂生长育肥猪的可行性，以提高其利用率及其在饲粮中的添加量，从而降低养殖成本。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 棉籽粕膨化加工工艺与参数

膨化原料：饲料级棉籽粕；试验设备：牧羊 56×2 挤压膨化机；膨化参数：调质温度 95 ℃、调质后物料水分 17.6%、螺杆转速 210 r/min、喂料速度 75 kg/h、膨化温度 132 ℃、模板吨料开口面积为 300 mm^2/（t·h）。

1.2 试验动物与分组

选用 80 头健康且平均体重为(28.78±3.09) kg 的杜×长×大商品代生长猪，按体重一致的原则随机分成 5 个组，每组 4 个重复，每个重复 4 头猪（公母各占 1/2），组间及各个重复间体重无显著性差异（P>0.05）。

1.3 试验饲粮与设计

试验期为 13 周（生长期和育肥期分别为 6 周和 7 周）。对照组饲喂全玉米–豆粕型基础饲粮，试验 1 组饲喂添加普通棉籽粕（生长期添加 5%普通棉籽粕，育肥期添加 10%普通棉籽粕）的饲粮，试验 2 组、试验 3 组、试验 4 组分别饲喂添加膨化棉籽粕（生长期分别添加 5%、10%和 15%膨化棉籽粕，育肥期分别添加 10%、15%和 20%膨化棉籽粕）的饲粮，各组饲粮中代谢能和粗蛋白质等营养水平均调配均衡。试验饲粮参照 NRC（2012）30~120 kg 生长猪营养需求标准配制，各组饲粮组成及营养水平见表 1。

表 1 饲粮组成及营养水平（风干基础）

Table 1 Composition and nutrient levels of diets (air-dry basis) %

项目 Items	对照组 Control group		试验 1 组 Experimental group 1		试验 2 组 Experimental group 2		试验 3 组 Experimental group 3		试验 4 组 Experimental group 4	
	生长期 Growing period	育肥期 Finishing period	生长期 Growing period	育肥期 Finishing period	生长期 Growing period	育肥期 Finishing period	生长期 Growing period	育肥期 Finishing period	生长期 Growing period	育肥期 Finishing period
原料 Ingredients										
玉米 Corn	64.7	69.1	63.3	66.3	63.3	66.3	62.1	65.2	61	63.9
豆粕 Soybean meal	23.0	18.6	18.5	9.6	18.5	9.6	13.8	4.8	9.0	0.2
棉籽粕 Cottonseed meal			5.0	10.0						
膨化棉籽粕 Extruded cottonseed meal					5.0	10.0	10.0	15.0	15.0	20.0
麦麸 Wheat bran	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0
豆油 Soybean oil	0.3	0.3	1.2	2.1	1.2	2.1	2.1	3.0	3.0	3.9
预混料 Premix[1)]	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0
合计 Total	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
营养水平 Nutrient levels[2)]										

代谢能 ME/（MJ/kg）	13.39	13.39	13.39	13.39	13.39	13.39	13.39	13.39	13.39	13.39
粗蛋白质 CP	17.42	15.89	18.24	15.90	18.61	15.77	18.48	15.47	18.30	16.01
粗脂肪 EE	4.47	3.42	6.95	4.54	5.38	4.29	5.83	5.55	7.48	6.64
钙 Ca	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68
总磷 TP	0.53	0.53	0.53	0.53	0.53	0.53	0.53	0.53	0.53	0.53
赖氨酸 Lys	0.84	0.88	0.79	0.89	0.77	0.90	0.73	0.91	0.73	0.83
蛋氨酸+半胱氨酸 Met+Cys	0.34	0.35	0.35	0.38	0.38	0.39	0.35	0.38	0.39	0.39
游离棉酚 Free gossypol/（mg/kg）			29.47	58.95	3.67	7.34	7.34	11.02	11.02	14.69

1)预混料为每千克饲粮提供 Premix provided the following per kg of diets:VA 65 000 IU,VD_3 37 500 IU,VE 450 mg,VK_3 15 mg,VB_1 24.2 mg,VB_2 73 mg,VB_6 36.2 mg,VB_{12} 0.73 mg,叶酸 folic acid 7.5 mg,泛酸 pantothenate 250 mg,生物素 biotin 5.0 mg,Fe 2.5 g,Cu 1.5 g,Zn 2.5 g,Mn 0.75 g,I 3.5 mg,Se 5.0 mg。

2)粗蛋白质、粗脂肪、赖氨酸和蛋氨酸+半胱氨酸实测值，其他为计算值。CP, EE, Lys and Met+Cys were measured values, while the others were calculated values.

1.4 饲养管理

试验在中国农业科学院南口中试基地进行，正式试验开始前 1 周对猪舍进行清洗并消毒。预试期 3 d，正试期 13 周，采用公母混养的圈养方式进行饲养，试验期间试验猪自由采食，自由饮水，保持猪舍清洁和通风，严格控制室温并定期消毒。分别于第 6 周、第 13 周末最后一天 08：00 空腹称重。

1.5 检测指标与方法

1.5.1 营养物质与游离棉酚含量

粗脂肪含量使用 M392885 全自动索氏抽提系统 Soxtec2050 进行测定，氨基酸含量采用 L–8900 高速氨基酸自动分析仪测定，粗蛋白质、干物质、粗灰分和游离棉酚含量分别采用 GB/T 6432—1994、GB/T 10358—1989、GB/T 6438—2007 和 GB/T 13086—1991 方法测定。

1.5.2 生长性能

生长性能指标测定以重复为单位计算试验猪末均重、平均日采食量、平均日增重和料重比。

1.5.3 血清生化指标

于试验期第 6 周、第 13 周末，每组随机抽取 8 头猪(每个重复随机取 2 头，1 公 1 母)，颈静脉空腹采集血液 5~10 mL，3 000 r/min 离心 5 min，制备血清。血清丙二醛（MDA）含量、总抗氧化能力（T-AOC）以及超氧化物歧化酶（SOD）、谷胱甘肽过氧化物酶（GSH-Px）活性采用南京建成生物工程研究所试剂盒测定，所用仪器为 L–3180 半自动生化分析仪；血清免疫球蛋白 G(IgG)、免疫球蛋白 A(IgA)、免疫球蛋白 M(IgM)含量均采用 KHB–1280 全自动生化分析仪测定；血清三碘甲腺原氨酸（T_3）、四碘甲腺原氨酸（T_4）含量采用放免法测

定，所用仪器为GC–1200全自动放免计数仪。

1.5.4　营养物质消化率

在试验期第6周和第13周最后3 d每天收集每组猪所产鲜粪，混匀后称重，每100 g粪中加入20 mL 5%的盐酸（HCl），然后在65 ℃烘箱烘72 h，置于室温条件下自然回潮24 h，粉碎过40目筛，制成风干样，保存备用、待测。参照国标方法测定饲粮和粪便中的营养物质和酸不溶性灰分含量，分别计算各个营养物质的表观消化率。

饲粮营养物质的表观消化率（%）=100－[（饲粮中指示剂含量×粪中营养物质含量）/（粪中指示剂含量×饲粮中营养物质含量）]×100。

1.6　数据处理

所有数据先用Excel 2007作初步统计，采用SAS 9.2统计软件中ANOVA程序进行单因素方差分析和协方差分析，并采用Duncan氏法进行多重比较和显著性分析，结果以平均值±标准差表示，显著性水平为$P<0.05$。

2　结果与分析

2.1　棉籽粕膨化前后营养物质和游离棉酚含量的变化

2.1.1　棉籽粕膨化前后营养物质含量的变化

由表2可知，棉籽粕经膨化处理后其主要的营养物质的含量变化较小，其中干物质含量降低了2.58%，粗蛋白质含量降低了4.37%，粗纤维含量提高了14.00%；膨化处理对粗脂肪、粗灰分以及各种氨基酸含量影响不大，其中，猪主要的限制性氨基酸——赖氨酸含量提高了1.53%，蛋氨酸含量降低了9.52%，总氨基酸含量提高了0.50%。

表2　棉籽粕膨化前后营养物质含量的变化(干物质基础)

Table 2　Changes of nutrient contents in cottonseed meal before and after extrusion （DM basis）　%

项目 Items	棉籽粕 Cottonseed meal	膨化棉籽粕 Expanded cottonseed meal
干物质 DM	90.82	88.48
粗蛋白质 CP	50.54	48.33
粗脂肪 EE	2.27	2.01
粗纤维 CF	11.28	12.86
粗灰分 Ash	6.21	6.23
氨基酸 Amino acids		
天冬氨酸 Asp	4.15	4.19
苏氨酸 Thr	1.50	1.49
丝氨酸 Ser	1.92	1.92
谷氨酸 Glu	9.34	9.34
甘氨酸 Gly	1.83	1.84
丙氨酸 Ala	1.73	1.73
半胱氨酸 Cys	1.44	1.37

缬氨酸 Val	2.11	2.10
蛋氨酸 Met	0.42	0.38
异亮氨酸 Ile	1.47	1.48
亮氨酸 Leu	2.79	2.79
酪氨酸 Tyr	0.90	0.98
苯丙氨酸 Phe	2.58	2.59
赖氨酸 Lys	1.96	1.99
组氨酸 His	1.22	1.23
精氨酸 Arg	5.31	5.44
脯氨酸 Pro	1.35	1.37
总氨基酸 TAA	42.01	42.22

2.1.2　棉籽粕膨化前后游离棉酚含量的变化

由表 3 可知，棉籽粕经膨化处理后游离棉酚含量从 589.47 mg/kg 降低至 71.06 mg/kg，降低了 87.95%，表明挤压膨化可有效降低棉籽粕中游离棉酚的含量，这主要是因为棉籽粕在膨化后，游离棉酚一部分被降解，一部分与蛋白质等结合形成结合棉酚[7-8]，从而达到棉籽粕脱毒的目的。

表 3　棉籽粕膨化前后游离棉酚含量的变化（干物质基础）

Table 3　Changes of free gossypol content of cottonseed meal before and after extrusion（DM basis）　mg/kg

项目 Item	棉籽粕 Cottonseed meal	膨化棉籽粕 Expanded cottonseed meal
游离棉酚 Free gossypol	589.47	71.06

2.2　膨化棉籽粕对生长育肥猪生长性能的影响

由表 4 可知，生长期，试验 1 组和试验 4 组末均重和平均日增重显著低于对照组（P<0.05），而试验 2 组和试验 3 组末均重和平均日增重与对照组相比无显著差异（P>0.05）；各试验组平均日采食量与对照组相比均无显著性差异（P>0.05）；试验 1 组和试验 4 组料重比显著高于对照组（P<0.05），试验 2 组料重比显著低于其他各组（P<0.05），试验 3 组料重比与对照组相比差异不显著（P>0.05），但显著低于试验 1 组（P<0.05）。育肥期，各组末均重、平均日增重、平均日采食量和料重比与对照组相比差异均不显著（P>0.05），但可看出，试验 1 组生长性能最差，试验 2 组和试验 3 组的料重比较低，而且育肥猪饲粮中添加 20%的膨化棉籽粕对育肥猪的生长性能无显著不良影响。全期，各组平均日采食量和平均日增重与对照组相比差异不显著（P>0.05）；试验 1 组和试验 4 组料重比显著高于对照组（P<0.05），试验 2 组料重比显著低于对照组（P<0.05），试验 3 组料重比与对照组相比差异不显著（P>0.05）。

表 4　膨化棉籽粕对生长育肥猪生长性能的影响

Table 4　Effects of expanded cottonseed meal on growth performance of growing-finishing pigs

项目 Items	对照组 Control group	试验 1 组 Experimental group 1	试验 2 组 Experimental group 2	试验 3 组 Experimental group 3	试验 4 组 Experimental group 4
生长期 Growing period					
初均重 AIBW/kg	28.89±3.70	29.02±3.82	28.08±2.59	29.06±3.50	28.89±3.54
末均重 AFBW/kg	62.17±6.52^{b}	55.17±5.69^{a}	59.80±4.50^{ab}	59.60±8.36^{ab}	55.63±9.00^{a}
平均日采食量 ADFI/kg	1.62±0.11	1.46±0.10	1.60±0.16	1.59±0.21	1.49±0.33
平均日增重 ADG/kg	0.77±0.11^{b}	0.61±0.05^{a}	0.74±0.07^{ab}	0.71±0.13^{ab}	0.58±0.16^{a}
料重比 F/G	2.26±0.05^{b}	2.43±0.02^{c}	2.07±0.11^{a}	2.29±0.10^{b}	2.54±0.12^{c}
育肥期 Finishing period					
末均重 AFBW/kg	108.05±12.38	100.93±8.39	106.12±7.60	104.11±7.05	101.00±14.16
平均日采食量 ADFI/kg	2.73±0.17	2.67±0.25	2.75±0.12	2.53±0.03	2.59±0.26
平均日增重 ADG/kg	0.92±0.13	0.92±0.07	0.93±0.12	0.89±0.04	0.91±0.11
料重比 F/G	2.86±0.20	2.91±0.06	2.81±0.07	2.85±0.08	2.86±0.12
全期 Whole period					
平均日采食量 ADFI/kg	2.26±0.18	2.15±0.24	2.40±0.24	2.16±0.15	2.24±0.18
平均日增重 ADG/kg	0.85±0.12	0.77±0.06	0.84±0.09	0.81±0.05	0.77±0.12
料重比 F/G	2.59±0.09^{b}	2.73±0.04^{c}	2.50±0.01^{a}	2.61±0.05^{b}	2.73±0.08^{c}

同行数据肩标不同小写字母表示差异显著(P<0.05)，相同小写字母或无字母表示差异不显著(P>0.05)。下表同。

In the same row, values with different small letter superscripts mean significant difference (P<0.05), while with the same small letter or no letter superscripts mean no significant difference (P>0.05). The same as below.

2.3　膨化棉籽粕对生长育肥猪血清生化指标的影响

2.3.1　膨化棉籽粕对生长育肥猪血清抗氧化指标的影响

由表 5 可知，生长期，与对照组相比，随着膨化棉籽粕添加量的增加，血清中 MDA 的含量显著降低（P<0.05），试验 3 组和试验 4 组血清 MDA 含量均显著低于对照组和试验 1 组（P<0.05）；与对照组相比，试验 4 组血清 T-AOC 及 SOD 和 GSH-Px 活性均显著升高（P<0.05），试验 3 组和试验 4 组各抗氧化指标均显著优于试验 1 组（P<0.05）。育肥期，与对照组相比，随着膨化棉籽粕添加量的增加，血清中 MDA 的含量显著降低（P<0.05），试验 3 组和试验 4 组血清 MDA 含量与试验 1 组相比显著降低（P<0.05）；试验 1 组血清 SOD 活性显著低于对照组、试验 3 组和试验 4 组（P<0.05），试验 4 组血清 SOD 活性显著高于对照组（P<0.05）；试验 1 组血清 T-AOC 显著低于对照组（P<0.05），试验 3 组和试验 4 组血清 T-AOC 均显著高于对照组（P<0.05）；试验 1 组血清 GSH-Px 活性显著低于其他各组（P<0.05）。

表 5　膨化棉籽粕对生长育肥猪血清抗氧化指标的影响

Table 5　Effects of expanded cottonseed meal on serum antioxidant indices of growing-finishing pigs

项目 Items	对照组 Control group	试验 1 组 Experimental group 1	试验 2 组 Experimental group 2	试验 3 组 Experimental group 3	试验 4 组 Experimental group 4
生长期 Growing period					
丙二醛 MDA/（nmol/mL）	4.87±0.18[c]	6.04±0.60[d]	5.20±0.13[c]	4.24±0.32[b]	3.58±0.37[a]
超氧化物歧化酶活性 SOD/（U/mL）	92.00±1.66[b]	77.78±4.00[a]	82.68±6.53[a]	96.31±4.50[bc]	102.98±4.78[c]
总抗氧化能力 T-AOC/（U/mL）	9.14±0.50[b]	7.17±0.37[a]	8.64±0.49[b]	9.40±0.93[b]	10.96±0.59[c]
谷胱甘肽过氧化物酶 GSH-Px/（g/L）	3.72±0.43[bc]	3.03±0.38[a]	3.46±0.23[ab]	4.05±0.19[c]	4.52±0.27[d]
育肥期 Finishing period					
丙二醛 MDA/（nmol/mL）	5.13±0.08[b]	6.03±0.55[c]	5.62±0.30[bc]	4.55±0.10[a]	4.28±0.44[a]
超氧化物歧化酶活性 SOD/（U/mL）	90.60±5.45[bc]	79.94±1.68[a]	85.95±4.81[ab]	94.82±6.32[cd]	99.18±6.15[d]
总抗氧化能力 T-AOC/（U/mL）	8.39±0.19[b]	7.80±0.50[a]	8.20±0.19[ab]	8.98±0.36[c]	9.70±0.40[d]
谷胱甘肽过氧化物酶 GSH-Px/（g/L）	4.16±0.51[b]	3.36±0.57[a]	4.05±0.18[b]	4.27±0.35[b]	4.48±0.32[b]

2.3.2 膨化棉籽粕对生长育肥猪血清免疫指标的影响

由表 6 可知，生长期，试验 4 组血清 IgG 和 IgA 含量显著高于对照组和其余各试验组（P<0.05），其余各试验组血清 IgG 含量略低于对照组，血清 IgA 含量略高于对照组，但均差异不显著(P>0.05);除试验 3 组与对照组和试验 1 组血清 IgM 含量差异不显著外(P>0.05)，试验 2 组和试验 4 组血清 IgM 含量显著高于对照组和其余各试验组（P<0.05）；试验 2 组血清 T_3 含量显著高于试验 1 组（P<0.05），各膨化棉籽粕组血清 T_4 含量均显著高于试验 1 组（P<0.05），但与对照组相比均差异不显著（P>0.05）。

育肥期，各试验组血清 IgG 含量与对照组相比均显著降低（P<0.05），除试验 2 组血清 IgA 含量与对照组相比差异不显著外（P>0.05），其余各试验组血清 IgA 含量均显著低于对照组（P<0.05），试验 1 组和试验 4 组血清 IgM 含量显著低于对照组（P<0.05），试验 2 组和试验 3 组血清 IgM 含量与对照组相比差异不显著（P>0.05），各试验组血清 T_3、T_4 含量与对照组相比均差异不显著（P>0.05），试验 2 组血清 T_3、T_4 含量显著高于试验 1 组（P<0.05）。

表 6 膨化棉籽粕对生长育肥猪血清免疫指标的影响

Table 6 Effects of expanded cottonseed meal on serum immune indices of growing-finishing pigs

项目 Items	对照组 Control group	试验 1 组 Experimental group 1	试验 2 组 Experimental group 2	试验 3 组 Experimental group 3	试验 4 组 Experimental group 4
生长期 Growing period					

免疫球蛋白 G IgG/(g/L)	9.07±0.40^{a}	8.43±0.93^{a}	8.04±0.95^{a}	8.05±0.39^{a}	10.28±0.57^{b}
免疫球蛋白 A IgA/(g/L)	1.03±0.06^{a}	1.09±0.10^{a}	1.10±0.05^{a}	1.05±0.05^{a}	1.27±0.05^{b}
免疫球蛋白 M IgM/(g/L)	0.87±0.07^{a}	0.75±0.05^{a}	1.00±0.09^{b}	0.80±0.08^{a}	1.04±0.09^{b}
三碘甲腺原氨酸 T_3/（ng/mL）	1.09±0.12^{ab}	0.81±0.06^{a}	1.41±0.47^{b}	1.06±0.21^{ab}	1.11±0.14^{ab}
四碘甲腺原氨酸 T_4/（ng/mL）	59.30±2.98^{bc}	41.97±2.38^{a}	64.22±6.63^{c}	61.06±3.98^{bc}	57.74±2.01^{b}
育肥期 Finishing period					
免疫球蛋白 G IgG/(g/L)	11.58±0.94^{c}	7.91±0.62^{a}	9.83±0.32^{b}	9.64±0.57^{b}	8.18±0.71^{a}
免疫球蛋白 A IgA/(g/L)	1.32±0.08^{b}	1.08±0.12^{a}	1.29±0.15^{b}	1.07±0.12^{a}	1.04±0.09^{a}
免疫球蛋白 M IgM/(g/L)	1.08±0.05^{b}	0.74±0.05^{a}	0.96±0.10^{b}	0.94±0.17^{b}	0.79±0.07^{a}
三碘甲腺原氨酸 T_3/（ng/mL）	1.13±0.14^{ab}	0.93±0.05^{a}	1.44±0.43^{b}	1.03±0.16^{ab}	1.30±0.32^{ab}
四碘甲腺原氨酸 T_4/（ng/mL）	6.74±0.52^{ab}	5.89±0.88^{a}	7.36±1.12^{b}	6.99±0.46^{ab}	6.89±0.89^{ab}

2.4 膨化棉籽粕对生长育肥猪营养物质表观消化率的影响

2.4.1 膨化棉籽粕对生长育肥猪营养物质表观消化率的影响

由表 7 可知，生长期，试验 1 组粗蛋白质表观消化率和干物质表观消化率显著低于对照组（P<0.05），各膨化棉籽粕组粗蛋白质表观消化率和干物质表观消化率与对照组相比均无显著性差异（P>0.05），各膨化棉籽粕组粗蛋白质表观消化率均显著高于试验 1 组（P<0.05），试验 2 组和试验 3 组干物质表观消化率均显著高于试验 1 组（P<0.05）；除试验 2 组粗脂肪表观消化率显著高于对照组和试验 1 组（P<0.05）外，其余各试验组粗脂肪表观消化率与对照组和试验 1 组相比均差异不显著（P>0.05）。结果表明，饲粮中添加膨化棉籽粕能显著提高育肥猪的营养物质表观消化率，但随着添加量的增加，营养物质表观消化率呈现降低趋势。

育肥期，各试验组粗蛋白质表观消化率均显著低于对照组（P<0.05），试验 1 组和试验 4 组干物质表观消化率显著低于对照组（P<0.05），各膨化棉籽粕组粗蛋白质表观消化率与试验 1 组均差异不显著（P>0.05），各膨化棉籽粕组干物质表观消化率均显著高于试验 1 组（P<0.05）；试验 3 组和试验 4 组粗脂肪表观消化率显著高于对照组和试验 1 组（P<0.05），且随着膨化棉籽粕添加量的增加，粗脂肪表观消化率逐渐升高。

表 7 膨化棉籽粕对生长育肥猪营养物质表观消化率的影响

Table 7 Effects of expanded cottonseed meal on nutrient apparent digestibility of growing-finishing pigs %

项目 Items	对照组 Control group	试验 1 组 Experimental group 1	试验 2 组 Experimental group 2	试验 3 组 Experimental group 3	试验 4 组 Experimental group 4
生长期 Growing period					
粗蛋白质 CP	81.65±1.28^{b}	78.74±1.45^{a}	82.29±1.00^{b}	81.55±0.94^{b}	80.91±0.63^{b}
粗脂肪 EE	79.97±0.87^{a}	80.97±1.41^{a}	82.93±1.04^{b}	80.74±1.14^{a}	81.29±0.71^{a}
干物质 DM	84.69±1.05^{bc}	82.30±1.38^{a}	84.94±0.32^{c}	84.50±0.25^{bc}	83.42±0.26^{ab}
育肥期 Finishing period					

粗蛋白质 CP	86.36±1.98[b]	80.55±1.78[a]	83.23±2.36[a]	83.11±1.46[a]	82.93±1.33[a]
粗脂肪 EE	74.46±1.34[a]	75.12±1.68[a]	78.45±5.31[ab]	80.77±1.83[b]	82.61±0.52[b]
干物质 DM	86.51±0.84[c]	83.10±0.46[a]	85.74±1.59[bc]	85.81±0.93[bc]	84.73±0.82[b]

2.4.2 膨化棉籽粕对生长育肥猪氨基酸表观消化率的影响

由表 8 可知，生长期，各组缬氨酸、蛋氨酸、赖氨酸、组氨酸、天冬氨酸、酪氨酸、谷氨酸、丙氨酸和总氨基酸的表观消化率均无显著性差异（$P>0.05$）；试验 1 组异亮氨酸、亮氨酸、苏氨酸、丝氨酸、半胱氨酸和脯氨酸氨表观消化率显著低于对照组（$P<0.05$），各膨化棉籽粕组上述指标与对照组相比差异不显著（$P>0.05$）；各膨化棉籽粕组氨基酸表观消化率均高于试验 1 组，且随着膨化棉籽粕添加量的增加，各氨基酸表观消化率均呈现升高的趋势，膨化处理显著提高了苯丙氨酸、精氨酸、苏氨酸、丝氨酸、甘氨酸和半胱氨酸的表观消化率（$P<0.05$）。

表 8 膨化棉籽粕对生长猪氨基酸表观消化率的影响

Table 8 Effects of expanded cottonseed meal on apparent digestibility of amino acids of growing pigs %

项目 Items	对照组 Control group	试验 1 组 Experimental group 1	试验 2 组 Experimental group 2	试验 3 组 Experimental group 3	试验 4 组 Experimental group 4
必需氨基酸 EAA					
缬氨酸 Val	62.04±3.40	54.53±4.37	61.60±4.18	62.60±5.90	61.11±1.39
蛋氨酸 Met	92.29±2.40	90.87±2.40	91.21±0.29	90.60±1.42	92.12±2.16
异亮氨酸 Ile	79.28±1.65[b]	73.11±2.64[a]	77.31±2.25[ab]	76.84±3.64[ab]	75.45±0.77[ab]
亮氨酸 Leu	87.84±1.27[b]	84.06±1.47[a]	86.25±1.85[ab]	86.98±1.98[ab]	86.12±0.17[ab]
苯丙氨酸 Phe	86.15±1.23[ab]	83.80±1.43[a]	86.03±1.25[ab]	86.98±1.57[b]	86.95±0.42[b]
赖氨酸 Lys	83.30±0.98	78.67±2.28	81.73±2.21	80.41±3.58	79.66±0.05
组氨酸 His	89.49±1.28	88.01±0.81	89.21±0.93	89.97±1.30	90.15±0.79
精氨酸 Arg	92.15±0.77[a]	92.48±0.28[a]	93.65±0.52[b]	94.27±0.77[b]	94.52±0.33[b]
苏氨酸 Thr	82.37±1.48[b]	77.93±1.71[a]	80.59±2.08[ab]	81.67±2.16[b]	80.76±0.56[ab]
非必需氨基酸 NEAA					
天冬氨酸 Asp	84.90±1.10	82.30±1.35	85.09±1.43	84.31±2.88	83.49±0.25
酪氨酸 Tyr	88.93±0.99	85.97±1.48	88.84±1.03	86.94±2.57	88.15±0.16
丝氨酸 Ser	88.68±1.10[b]	85.44±0.94[a]	86.96±1.41[ab]	88.16±1.30[b]	87.87±0.05[b]
谷氨酸 Glu	90.80±0.97	89.47±0.84	91.23±1.18	91.49±1.57	91.02±0.09
甘氨酸 Gly	81.74±1.72[ab]	78.39±2.05[a]	81.51±1.76[ab]	82.44±2.49[b]	82.09±0.57[ab]
丙氨酸 Ala	82.39±1.52	78.99±1.97	82.47±2.16	82.44±3.62	81.32±0.19
半胱氨酸 Cys	92.90±0.44[b]	91.69±0.42[a]	93.59±0.35[b]	93.22±1.10[b]	93.10±0.13[b]
脯氨酸 Pro	86.59±2.13[b]	82.33±1.47[a]	83.83±2.10[ab]	83.49±1.91[ab]	83.02±0.92[ab]
总氨基酸 TAA	85.78±1.34	83.03±1.43	85.53±1.57	85.86±2.22	85.47±0.21

由表 9 可知，育肥期，试验 1 组和试验 4 组必需氨基酸中的缬氨酸、异亮氨酸、亮氨酸、赖氨酸、组氨酸、苏氨酸和非必需氨基酸中的天冬氨酸、酪氨酸、丝氨酸、胱氨酸和脯氨酸表观消化率均显著低于对照组（P<0.05），各膨化棉籽粕组其余氨基酸表观消化率均低于对照组，但差异不显著（P>0.05）；各膨化棉籽粕组所有氨基酸表观消化率均高于试验 1 组，其中苯丙氨酸、精氨酸、丝氨酸、谷氨酸和甘氨酸表观消化率均显著高于试验 1 组（P<0.05）；随着膨化棉籽粕添加量的增加，各氨基酸表观消化率呈现先升高后降低的趋势，当膨化棉籽粕添加量高达 20%时，各氨基酸表观消化率均高于试验 1 组。

表 9　膨化棉籽粕对育肥猪氨基酸表观消化率的影响

Table 9　Effects of expanded cottonseed meal on apparent digestibility of amino acids of finishing pigs　　%

项目 Items	对照组 Control group	试验 1 组 Experimental group 1	试验 2 组 Experimental group 2	试验 3 组 Experimental group 3	试验 4 组 Experimental group 4
必需氨基酸 EAA					
缬氨酸 Val	85.35±2.52[c]	79.44±1.73[a]	82.61±1.65[bc]	83.30±1.69[bc]	81.47±2.02[ab]
蛋氨酸 Met	77.09±3.91	72.54±3.25	74.35±2.65	72.53±2.42	72.49±4.15
异亮氨酸 Ile	84.46±2.54[c]	77.78±1.95[a]	81.84±1.78[bc]	81.74±1.88[bc]	79.15±2.40[ab]
亮氨酸 Leu	88.01±2.25[b]	83.54±1.58[a]	85.95±1.63[ab]	85.59±1.22[ab]	84.71±1.58[a]
苯丙氨酸 Phe	87.99±2.05[b]	83.10±1.38[a]	86.19±1.33[b]	86.73±1.24[b]	86.33±1.37[b]
赖氨酸 Lys	86.17±3.31[c]	79.38±1.74[a]	82.20±2.08[ab]	83.12±1.75[bc]	78.59±2.48[a]
组氨酸 His	91.75±2.48[b]	87.87±1.01[a]	89.66±1.41[ab]	89.32±0.94[a]	88.45±0.99[a]
精氨酸 Arg	93.35±1.84[b]	89.98±0.81[a]	92.05±1.00[b]	92.37±0.73[b]	92.24±0.83[b]
苏氨酸 Thr	85.08±2.50[c]	78.32±1.93[a]	81.77±1.72[b]	83.48±1.67[bc]	81.27±2.23[ab]
非必需氨基酸 NEAA					
天冬氨酸 Asp	87.04±2.32[c]	81.55±1.65[a]	85.12±1.66[bc]	85.63±1.41[bc]	84.01±1.98[ab]
酪氨酸 Tyr	87.14±2.28[c]	81.50±2.13[a]	85.19±1.36[bc]	84.14±1.63[ab]	84.09±1.76[ab]
丝氨酸 Ser	89.28±1.93[c]	84.44±1.22[a]	87.38±1.40[bc]	87.69±0.88[bc]	86.85±1.47[b]
谷氨酸 Glu	91.02±1.65[b]	87.83±1.25[a]	90.02±1.52[b]	90.54±0.78[b]	90.37±1.41[b]
甘氨酸 Gly	84.95±1.98[b]	79.1±1.90[a]	83.14±1.49[b]	83.73±1.45[b]	82.23±2.11[b]
丙氨酸 Ala	83.97±2.59[b]	78.35±2.05[a]	81.93±2.19[b]	82.45±1.63[b]	80.71±2.28[ab]
半胱氨酸 Cys	91.12±1.61[b]	89.16±0.53[a]	89.64±0.48[ab]	89.76±1.15[ab]	89.11±1.24[a]
脯氨酸 Pro	90.55±2.25[b]	86.35±1.25[a]	87.38±1.29[a]	86.86±1.04[a]	85.49±1.08[a]
总氨基酸 TAA	88.24±2.18[b]	83.51±1.49[a]	86.25±1.54[b]	86.63±1.12[b]	85.60±1.65[ab]

3 讨 论

3.1 挤压膨化对棉籽粕营养物质和游离棉酚含量的影响

3.1.1 挤压膨化对棉籽粕营养物质含量的影响

一般认为膨化加工不会影响物料中粗蛋白质的含量，而氨基酸的破坏程度与加工条件有关。胡维岗等[12]研究发现，当棉籽粕膨化温度为 120 ℃时，膨化棉籽粕粗蛋白质含量与未膨化棉籽粕相比没有显著变化，粗纤维含量会有所降低，还有研究发现，膨化处理对粗纤维有一定的降解作用[13-14]，但本试验中，棉籽粕经挤压膨化后粗纤维含量略有升高，这与前人研究不一致，具体原因有待后期进一步研究。在本试验中，棉籽粕经膨化处理后粗蛋白质含量略有降低，氨基酸含量略有升高，可能是因为蛋白质变性后，一部分高分子蛋白降解为小分子多肽和部分氨基酸导致的，氨基酸未被破坏说明本试验中选取的棉籽粕挤压膨化加工工艺参数比较合适。刘玉环等[10]研究发现玉米在膨化后粗脂肪含量有所下降，本研究结果中膨化棉籽粕粗脂肪含量降低的原因可能是脂肪及其水解产物可在膨化过程中与糊化的淀粉形成淀粉–脂肪复合物[15]，有关膨化对粗脂肪影响的研究不多，有待进一步的试验探究。

3.1.2 挤压膨化对棉籽粕游离棉酚含量的影响

于涛等[6]研究表明，棉籽粕在高温、高压和高剪切力作用下，经过输送、糅合、机械剪切以及加热等工序，最后在模口处温度、压力骤降，其内部水分瞬间蒸发，游离棉酚一部分在高温、高压和高湿条件下与蛋白质相结合形成结合棉酚，另一部分游离棉酚发生降解反应，从而使游离棉酚的含量显著降低。魏二虹等[11]认为，热处理过程中加热的温度、时间和湿度对棉籽粕中结合棉酚和游离棉酚的含量均有极显著的影响。本试验中，棉籽粕经挤压膨化处理后游离棉酚含量从 589.47 mg/kg 降低到了 71.06 mg/kg，降低了 87.85%，表明挤压膨化能够有效降低棉籽粕中游离棉酚的含量。这主要是因为棉籽粕经挤压膨化处理后，游离棉酚一部分被降解，一部分与蛋白质等结合形成结合棉酚，使棉籽粕中游离棉酚的含量降低，棉籽粕达到脱毒效果，从而提高棉籽粕在畜禽饲粮中的利用率。

3.2 膨化棉籽粕对生长育肥猪生长性能的影响

棉籽粕经膨化处理后，能有效去除游离棉酚的同时，还能有效降解纤维，使蛋白质变性、淀粉高度糊化，大大改善棉籽粕的品质，提高棉籽粕的利用率；同时棉籽粕经膨化后会产生特有的糊香味，改善饲粮适口性[14,16]。秦金胜等[17]研究发现，与对照组相比，使用 10%的普通棉籽粕替代豆粕可显著降低生长猪的平均日增重，增加料重比；李敏[18]研究了脱酚棉籽蛋白对 15~35 kg 仔猪、35~60 kg 生长猪、60~100 kg 育肥猪 3 个阶段猪生长性能的影响，结果表明，综合考虑其在生长育肥猪饲粮中适宜添加比例在 5%~15%为宜，且对猪胴体性能及肉品质无显著影响。

本试验研究结果表明，在生长猪阶段时，饲粮中添加适量比例的膨化棉籽粕能显著提高生长猪的生长性能，但 5%普通棉籽粕组和对照组与膨化棉籽粕组相比生长性能出现了明显的抑制作用，这说明膨化显著提高了生长猪对棉籽粕的利用率。这与秦金胜等[17]研究结

果相似，这主要是因为棉籽粕中含有大量的游离棉酚，而游离棉酚有抑制胃泌素释放的作用，会引起腹胀、食欲下降等症状，从而降低采食量，抑制体重的增加[19]，严重影响了生长猪对饲粮的消化利用率，对生长猪产生了抑制作用。而当膨化棉籽粕添加量增加到 15%时，其对生长猪的生长性能出现了明显的抑制作用，说明虽然膨化处理可以提高生长猪对棉籽粕的消化利用率，但在使用过程中应注意不同生长阶段的合理添加量。其主要原因可能是随着膨化棉籽粕添加量的增加，饲粮中的游离棉酚和其他抗营养因子含量逐渐增加，导致生长猪对饲粮的利用率逐渐降低，从而导致其生长性能下降。而在育肥猪阶段，饲粮中膨化棉籽粕添加量高达 20%时不影响生长猪的生长性能，且饲粮中添加 10%~20%膨化棉籽粕组的生长猪的生长性能均优于 10%普通棉籽粕组，与对照组均无显著性差异。这说明膨化加工能提高棉籽粕在育肥猪饲粮中的添加量，在不同的生长阶段添加合适的比例能够降低料重比，降低饲料成本，提高饲料报酬。

3.3 膨化棉籽粕对生长育肥猪血清生化指标的影响

3.3.1 膨化棉籽粕对生长育肥猪血清抗氧化指标的影响

T-AOC 是机体内抗氧化力量的总体体现[20]，T-AOC 值的大小可反映机体自由基代谢的状态，以及机体对外来刺激的代偿能力[21]。SOD 能通过催化消除超氧阴离子（O_2^-）自由基起到阻碍活性氧的产生，保护细胞的正常功能，其活性的高低间接反映机体清除自由基的能力[22]。SOD 和 GSH-Px 是动物体内抗氧化酶促系统的一部分，它们之间存在着相互补充、相互依赖的关系，主要起到抗氧化的作用。Knych[23]研究表明，SOD 可以抑制游离棉酚抗血管内皮依赖性产生耐受性。MDA 含量间接反映出细胞损伤的程度及机体氧化和抗氧化之间的平衡关系，可间接表示脂质的过氧化程度。杨茹洁[24]报道，饲粮中游离棉酚的含量对蛋鸡血清中 SOD 的含量影响与对照组相比无显著性差异，且随着饲粮中游离棉酚含量的增加，SOD 的活性变化不显著。张爱婷[25]研究结果表明，各试验组血清抗氧化指标，包括 T-AOC、GSH-Px 和 SOD 活性以及 MDA 含量与对照组相比差异不显著。

本研究结果中，饲粮中添加膨化棉籽粕生长猪血清中 T-AOC、SOD 和 GSH-Px 活性显著高于对照组，MDA 含量显著低于对照组，说明饲粮中添加膨化棉籽粕能够提高生长育肥猪的抗氧化能力，从而促进生长猪体内自由基代谢的状态，提高机体清除自由基的能力，保护细胞的正常功能。添加普通棉籽粕组生长猪血清中 T-AOC、SOD 和 GSH-Px 活性显著低于对照组，MDA 含量显著高于对照组，说明棉籽粕不经过脱毒处理会降低机体自由基的代谢能力。这可能是因为游离棉酚的存在，一定程度上导致生长育肥猪体内抗氧化功能受损，间接影响了体内脂肪代谢。这与杨茹洁[24]和张爱婷等[25]研究结果不一致，可能是因为棉籽粕质量、膨化工艺参数的差异导致膨化棉籽粕的质量和脱毒效果不同，以及膨化棉籽粕添加量的不同导致的。

关于膨化棉籽粕对血清抗氧化功能影响在猪上的研究报道不多，棉籽粕中的游离棉酚及其他抗营养因子是否会对其产生影响还有待进一步研究。

3.3.2 膨化棉籽粕对生长育肥猪免疫指标的影响

血清中 IgG、IgA 及 IgM 的含量反映机体体液免疫的能力。其中，IgG 是抗感染免疫主要的免疫球蛋白、是初级免疫应答中最持久、最重要的抗体；IgA 同样具有抗菌、抗病毒、抗毒素的免疫学活性；IgM 占血清免疫球蛋白总量的 5%~10%，主要在感染初期发挥免疫作用。T_3、T_4 是诊断诊断甲状腺功能的主要指标，在甲状腺功能亢进时，血清 T_3、T_4 均增高，而在甲状腺功能减退时，二者均低于正常值。本试验中，生长猪阶段，饲粮中添加膨化棉籽粕有提高 IgG、IgA、IgM 和 T_3、T_4 的趋势，说明饲粮中添加膨化棉籽粕能提高生长猪的免疫功能和基础代谢率，可能是因为膨化棉籽粕组饲粮中游离棉酚含量较低。同时也可能是膨化降低了棉籽粕中有毒成分及有害微生物，使粗纤维发生降解、细化，提高营养物质消化率，从而改善机体的生长状况，在一定程度上缓解了膨化棉籽粕中的游离棉酚对生长猪免疫性能的影响，还有待于进一步研究。

随着饲喂时间的延长，在育肥猪阶段，膨化棉籽粕组血清中 IgG、IgA 和 IgM 含量与对照组相比显著降低，T_3、T_4 与对照组相比均无显著性差异，10%棉籽粕组 IgG 和 IgM 含量显著低于 10%膨化棉籽粕组，说明膨化棉籽粕能显著提高生长猪的免疫功能，不过高棉籽粕饲粮会显著降低生长猪的免疫性能，且长期饲喂膨化棉籽粕也会在一定程度上降低生长猪的免疫性能，但对甲状腺的功能无明显影响，这与张爱婷等[27]的研究结果一致。

3.4 膨化棉籽粕对生长育肥猪营养物质表观消化率的影响

膨化处理破坏了蛋白质分子的三级结构，疏水基团暴露产生不可逆变性，这种变性有利于消化酶作用，从而提高了对蛋白质的消化率。Thomas 等[15]研究表明，棉籽粕经过膨化处理后，脂肪易与淀粉基质结合形成淀粉–脂肪复合物，从而增加脂肪的稳定性，另外，饲料在膨化过程中脂肪浸到细胞表面，还可以改善饲料的外观和适口性。本试验中，与普通棉籽粕组相比，饲粮中添加膨化棉籽粕与普通棉籽粕相比可显著提高生长猪的粗蛋白质、粗脂肪、干物质和氨基酸表观消化率，与对照组之间差异不显著。说明挤压膨化可显著提高棉籽粕的消化利用率，可使其饲用价值与豆粕相媲美，这与刘艳丰等[26]的研究结果一致。随着饲喂时间的延长，添加膨化棉籽粕组的粗蛋白质、粗脂肪和干物质表观消化率均呈降低的趋势，说明随着饲喂时间的延长，生长育肥猪对添加膨化棉籽粕饲粮的营养物质消化率逐渐降低，这可能是由于未代谢完全的游离棉酚不断积累在生长猪体内，损伤其消化道，刺激消化道黏膜，引起消化道溃疡，导致胃肠炎；还可能因为游离棉酚通过和酶的底物结合而降低酶的作用，或通过与活性位点结合、改变活性位点的特性等方式使酶失活，从而降低了生长猪对营养物质的消化吸收率[19,27]。研究表明，在棉籽粕饲粮中额外添加少量的硫酸亚铁、赖氨酸或维生素 E 可有效降低游离棉酚对畜禽的影响[28]。因为赖氨酸和维生素 E 可与游离棉酚结合形成复合物，降低游离棉酚的毒性[29]，所以在使用膨化棉籽粕时可考虑协同硫酸亚铁、赖氨酸等添加剂使用。

4 结 论

① 挤压膨化处理对棉籽粕的营养物质含量无显著影响，总氨基酸含量和各种必需氨基酸含量均略有升高，游离棉酚含量显著降低，降低高达 87.85%。

② 饲粮中添加相同含量的膨化棉籽粕与普通棉籽粕相比，能显著提高生长猪的生长性能，棉籽粕经过膨化加工处理后，可显著提高膨化棉籽粕在生长育肥猪饲粮中的添加量，生长猪阶段饲粮中添加量可达 15%，育肥猪阶段饲粮中添加量可达 20%。但随着膨化棉籽粕添加量的进一步增加，生长育肥猪的平均日采食量、平均日增重开始呈现降低的趋势，料重比开始呈升高趋势。

③ 饲粮中添加相同含量的膨化棉籽粕与普通棉籽粕相比，能显著提高生长猪的血清抗氧化能力和免疫能力。

参考文献：

[1] 阎铁洁,宋维平,张建云.棉籽饼粕在畜禽中的应用及棉酚的脱毒方法研究[J].饲料工业,2005,26(3):47–50.

[2] ROBINSON P H,GETACHEW G,DE PETERS E J,et al.Influence of variety and storage for up to 22 days on nutrient composition and gossypol level of Pima cottonseed (*Gossypium* spp.)[J].Animal Feed Science and Technology,2001,91(3/4):149–156.

[3] FRANCIS G,MAKKAR H P S,BECKER K.Antinutritional factors present in plant-derived alternate fish feed ingredients and their effects in fish[J].Aquaculture,2001,199(3/4):197–227.

[4] 周兆毅.膨化乳猪颗料饲料技术探讨[J].粮食与饲料工业,1995(9):26–27.

[5] CHAE B J,HAN I K,KIM J H,et al.Effects of extrusion conditions of corn and soybean meal on the physico-chemical properties,ileal digestibility and growth of weaned pig[J].Asian-Australasian Journal of Animal Sciences,1997,10(2):170–177.

[6] 于涛,申德超,庞芳.棉籽粕脱毒方法的研究进展[J].山东理工大学学报（自然科学版）,2006(4):88–92.

[7] RHEE K S,ZIPRIN Y A,CALHOUN M C.Antioxidative effects of cottonseed meals as evaluated in cooked meat[J].Meat Science,2001,58(2):117–123.

[8] 赵爱民.挤压膨化产品的评定指标及其技术在食品领域中的应用[J].福建轻纺,2008(10):30–33.

[9] 王玮,刘恩岐.挤压加工对食品营养品质的影响[J].农产品加工·学刊,2008(3):71–74.

[10] 刘玉环,林向阳,阮榕生,等.挤压膨化过程中食品营养成分的变化[J].农产品加工:学刊,2005(2):31–33,36.

[11] 魏二虹,张文举,刘东军.不同热处理对棉籽饼中棉酚含量的影响[J].石河子大学学报:自科版,2010,28(1):52–57.

[12] 胡维岗,黄庆德,张强,等.挤压膨化温度对棉粕游离棉酚及营养成分的影响[J].食品工业科技,2015,36(5):247–250.

[13] 金希亿,张宪国,姜山,等.干法挤压膨化对大豆品质的影响及作用机理[J].饲料工业,1995(4):9–11.

[14] 倪海球,杨玉娟,于纪宾,等.挤压膨化加工对菜籽粕中抗营养因子含量及膨化菜籽粕对生长育肥猪生长性能的影响[J].动物营养学报,2017,29(7):2295–2306.

[15] THOMAS M,VAN DER POEL A F B.Effects of expander processing on the chemical,physical and hygienic quality of feed:effects on the physical quality of feed[M].Wageningen:Wageningen Feed Processing Centre,1997.

[16] 周建国,王洪武,林炳鉴.棉籽粕双螺杆挤压脱毒中几个工艺参数的研究[J].农业工程学报,2000,16(6):110–113.

[17] 秦金胜,禚梅,许衡,等.发酵棉粕和普通棉粕替代豆粕对猪生长性能的影响[J].新疆农业大学学报,2010,33(6):496–501.

[18] 李敏.脱酚棉籽蛋白的饲用价值研究(猪)[D].硕士学位论文.长沙:湖南农业大学,2012.

[19] 赵大伟,劳泰财,叶强,等.棉酚的特性与棉籽粕脱毒方法的研究进展[J].广东饲料,2015,24(6):37–40.

[20] 张英彪,李纯颖,李勇,等.甲醛和苯对小鼠睾丸总抗氧化能力和 ATP 酶及钙的影响[J].实用预防医学,2008,15(1):64–66.

[21] HONIKEL K O.How to measure the water-holding capacity of meat? Recommendation of standardized methods[M]//TARRANT P V, EIKELENBOOM G, MONIN G.Evaluation and control of meat quality in pigs.Netherlands:Springer,1987:129–142.

[22] DECKER E A.The role of phenolics,conjugated linoleic acid,carnosine,and pyrroloquinoline quinone as nonessential dietary antioxidants[J].Nutrition Reviews,1995,53(3):49–58.

[23] KNYCH E T.Endothelium-dependent tolerance to ethanol-induced contraction of rat aorta:effect of inhibition of EDRF action and nitric oxide synthesis[J].Alcoholism Clinical & Experimental Research,1992,16(1):58–63.

[24] 杨茹洁.可消化 AA 平衡的高棉粕饲粮对蛋鸡的生产性能、健康状况及蛋品质的影响[D].硕士学位论文.晋中:山西农业大学,2003.

[25] 张爱婷,朱巧明,顾林英,等.膨化棉籽粕对蛋鸡生产性能、蛋品质及血清生化指标的影响[J].动物营养学报,2012,24(6):1143–1149.

[26] 刘艳丰,唐淑珍,侯广田,等.不同棉酚含量的棉副产品对阿勒泰羊生产性能和血液指标的影响[J].饲料博览,2012(6):25–29.

[27] 张采.挤压膨化原理以及膨化对饲料中各种营养成分的影响[J].当代畜牧,2008(9):34–37.

[28] VELASQUEZ-PEREIRA J,RISCO C A,MCDOWELL L R,et al.Long-term effects of feeding gossypol and vitamin E to dairy calves[J].Journal of Dairy Science,1999,82(6):1240–1251.

[29] 付裕贵,易建明,马承融,等.影响棉籽饼有效赖氨酸含量因素的试验研究[J].畜牧兽医学报,1998,29(3):225–231.

Quality Changes of Cottonseed Meal Before and After Expansion and Their Effects on Growth Performance, Serum Biochemical Indices and Nutrient Apparent Digestibility of Growing-Finishing Pigs

NI Haiqiu[1] SUN Jie[2] YANG Yujuan[1,3] YU Jibin[1] MA Shifeng[1] WANG Hao[1] SHANG Fangfang[1] LI Junguo[1,4*]

（1. *Feed Research Institute*, *Chinese Academy of Agriculture Sciences*, *Beijing* 100081, *China*; 2. *Shanghai Xinnong Feed Co., Ltd., Shanghai* 201613, *China*; 3. *Institute of Food and Nutrition Development, Ministry of Agriculture*, *Beijing* 100081, *China*; 4. *Key Laboratory of Feed Biotechnology of Ministry of Agriculture*, *Beijing* 100081, *China*）

Abstract: The aim of the experiment was to investigate the effects of wet extrusion on the content of nutrients and free gossypol in cotton meal (CM) and explore the effects of extruded cotton meal (ECM) on growth performance, serum biochemical indices and nutrient apparent digestibility of growing-finishing pigs. Firstly, *Muyang* 56×2 expanding machine and the early optimized processing parameters were used to expand the CM, and the content changes of nutrients and free gossypol in CM and ECM were measured. Then, CM and ECM were used as the main experiment materials, and eighty pigs (Duroc×Landrace×Large White) with the body weight of (28.78±3.09) kg were randomly allocated to 5 groups with 4 replicates each and 4 pigs in each replicate (half male and half female). Pigs in control group were fed an all corn-soybean meal base diet, in experimental group 1 were fed the basal diet supplemented with 5% CM to growing pigs and 10% CM to finishing pigs, and in experimental groups 2, 3 and 4 were fed the basal diets supplemented with 5%, 10% and 15% ECM to growing pigs and 10%, 15% and 20% ECM to finishing pigs, respectively. The metabolic energy, crude protein content and other nutrition levels in all diets were balanced. The experiment lasted for 13 weeks with 6 weeks of growing period and 7 weeks of finishing period. The results showed as follows: 1) extrusion on CM had no obvious effects on nutrient content, and the contents of total amino acids and essential amino acids in ECM were increased slightly, while the free gossypol content in ECM was decreased by 87.85%. 2) In the growing stage, compared to 5% CM, dietary 5% ECM increased the average daily feed intake and average daily gain of pigs (P>0.05), significantly decreased the ratio of feed to gain （P<0.05）, and significantly increased the apparent digestibility of crude protein, dry matter, ether extract and some amino acids（P<0.05）. Compared with CM, the serum malondialdehyde（MDA） content was significantly reduced, and the serum total antioxidant capacity (T-AOC), superoxide dismutase (SOD) activity, glutathione peroxidase (GSH-Px) activity were significantly improved after the pigs were fed the diets supplemented with ECM （P<0.05）. The serum contents of immunoglobulin, triiodothyronine and tetraiodothyronine were tend to be enhanced of growing pigs by feeding the ECM compared with CM. With the addition of ECM increasing, the growth performance and nutrient apparent digestibility of the growing pigs showed a decreasing trend, and there was no significant difference between 15% ECM group and common CM group （P>0.05）. 3) During the finishing stage, there were no significant differences in the final average body weight, average daily weight gain and average daily intake from the ECM groups to the control group and common CM group （P>0.05）. However, the feed to gain ratio in experimental groups 1 and 3 was significantly lower than that in experimental group 1 during the whole stage (P<0.05). It can also significantly improve the antioxidant capacity and immunity of finishing pigs

fed the ECM compared with the CM, and with the addition of ECM increasing, the serum MDA content of finishing pig was significantly decreased (*P*<0.05), and the serum T-AOC, activities of SOD and GSH-Px were increased gradually (*P*<0.05). Compare with the control group, the apparent digestibility of crude protein and dry matter was significantly lower than that in experimental groups （*P*<0.05）. The crude protein apparent digestibility in ECM groups was not significant different compared with experimental group 1 （*P*>0.05）. The dry matter apparent digestibility in ECM groups was significantly higher than that in experimental group 1 (*P*<0.05). The ether extract apparent digestibility in experimental groups 3 and 4 was significantly higher than that in the control group and experimental group 1 (*P*<0.05). With the addition of ECM increasing, the ether extract apparent digestibility was increased gradually. The addition of a moderate amount of ECM can significantly improve the apparent digestibility of amino acids compared with CM (*P*<0.05). Thus, the effects of extruded puffing on the nutrient contents of CM is not obvious, but can significantly increase the free gossypol content in CM. Dietary ECM can improve the growth performance, antioxidant capacity, immune capacity and nutrient apparent digestibility of growing-finishing pigs, and it is suggested that the amount of ECM for the growing pig is about 15%, and for finishing pig is about 20%.

Key words: expanded cottonseed meal; growing-finishing pig; free gossypol; growth performance; serum biochemical index; apparent digestibility[i]

[i]*Corresponding author, professor, E-mail: lijunguo@caas.cn (责任编辑　田艳明)